

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：37116

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340128

研究課題名（和文） 秒速10km超での固体衝突実験と惑星大気形成過程への応用

研究課題名（英文） Impact experiments at higher velocities than 10 km/s and application to the planetary atmosphere formation process

研究代表者 門野敏彦 (KADONO TOSHIHIKO)

産業医科大学・医学部・教授

研究者番号 60359198

研究成果の概要（和文）：高出力レーザーを用いてサブミリメートルサイズの弾丸および平板飛翔体を加速した。従来の加速方法ではこのサイズの飛翔体は秒速数kmまでしか加速できなかったが、本研究では秒速10km以上（最高秒速60km）に加速することに成功した。この技術を使って岩石標的に対して超高速衝突実験を行い、衝突によって発生する高圧状態での岩石物質の状態方程式、高圧から解放後に発生する蒸気の組成や熱力学状態、クレーターサイズ、放出破片、クレーター深部の状態、など、これまで全く実験的データの無かった未知領域での知見を数多く得ることが出来た。

研究成果の概要（英文）：We develop a new flyer acceleration technique using a high-power laser, Gekko XII, at Osaka University, which can accelerate sheet flyers with a diameter of ~0.5 mm and a thickness of ~30 - 50 μm and spherical projectiles with a diameter of 0.1 - 0.3 mm to velocities higher than 10 km/s up to 60 km/s. Using this technique, we carry out impact experiments to investigate impact vapor and melt, equation of state, craters, and ejecta. Obtained data are quite new and important for various themes in the field of planetary science.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：惑星科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：隕石衝突、秒速10km超、高出力レーザー、弾丸加速

1. 研究開始当初の背景

原始惑星表面においては、秒速10kmを越える速度で隕石の衝突が起こっていた。このような超高速での衝突では、岩石も蒸発すると言われており、初期地球において大気・海洋、さらには生命の起源と進化にも衝突が重要な役割を果たしたとされている。このよ

うな衝突現象に対して実験室で定量的に詳細な研究を行うためには現状の計測・分析装置ではサブmm以上の飛翔体が必要であるが、既存の飛翔体加速装置ではこのような大きさの弾丸を秒速10km以上に加速することは難しかった。つまり、これまで原始惑星における衝突・蒸発過程を室内実験により

定量的に研究することは非常に困難な状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 XII 号レーザーを用いて効率よく球状飛翔体を秒速 10 km 以上に加速する技術を開発して室内で衝突実験を行い、原始地球などで衝突が大気形成にどのような役割を果たしたのかを理解することを目的としている。

3. 研究の方法

高出力パルスレーザーを弾丸または平板飛翔体に照射する。飛翔体の表面は蒸発し、そのプラズマ蒸気はレーザーのエネルギーを吸収し高温・高圧となる。この蒸気が膨張する反作用で飛翔体を加速する。飛翔体の形状、サイズ、材質を変えて実験を行い、最適な加速条件を求める。

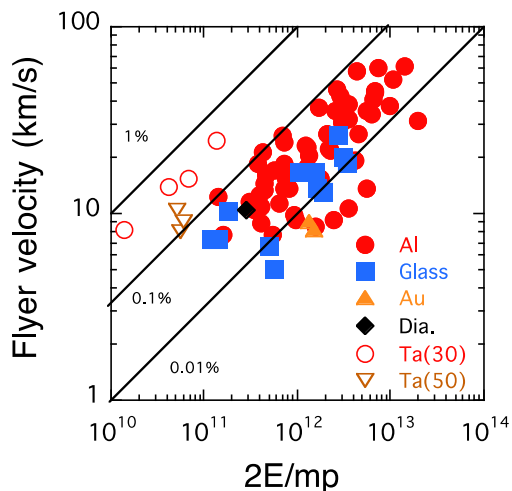
飛翔体の速度はストリークカメラを使って加速過程を撮影することにより求めることができる。また、同時にフレーミングカメラを使って2次元像を撮影することで飛翔体の形状を確認する。

上記の加速方法により飛翔体を加速し、標的として岩石を用いた衝突実験を行う。飛翔体と標的の間隔などが重要な開発要素となるため、設置の仕方などを考慮しながら実験を行う。

計測装置として、ドップラー効果を利用した VISAR (干渉計)、時間分解型分光器、X線ピンホールカメラ、ガス質量分析装置 (QMS)、を用いてその場計測を行う。さらに標的を回収してクレーター、破片、クレーター内部の分析を詳細に行う。

4. 研究成果

これまでにアルミニウム、ガラス、金、ダイヤモンド粒子の加速に成功した。また、平板



飛翔体としてタンタル箔の加速も行った。本研究で行った加速実験の結果を図に示す。縦軸は飛翔体の速度の対数プロットである。横軸はレーザーエネルギーを飛翔体の質量で規格化した量の対数プロットである。もし、レーザーエネルギーから飛翔体の運動エネルギーへの変換効率が一定ならば、速度はこの図上で傾き 1/2 の直線に従うはずである。図には一定の変換効率 (1%, 0.1%, 0.01%) の直線がかかっている。本研究では、データは幅を持っているものの、おおよそ傾きは 1/2 であり、効率は弾丸が 0.1 から 0.01%, 平板飛翔体は 1 から 0.1% であった。また、ガラスよりもアルミニウムの方が効率が良く、金は効率が悪かった。

この飛翔体加速技術を用いて下記の衝突実験を行った。

(1) 衝突により発生する高圧状態での鉱物の状態方程式計測

薄片にした鉱物標的に対して、衝突面の裏側から VISAR により衝撃波速度および粒子速度を計測する。これにより秒速 10 km 以上の衝突で発生する圧力 (数百 GPa) での Forsterite, Diopside のユゴニオ状態方程式データを取得した。(東大・宇宙研・阪大レーザー研との共同研究)

(2) 衝突によって発生する蒸気の熱力学状態

高圧状態から解放された後、蒸気となり膨張する過程を時間分解型分光器で観測し、蒸気の組成 (原子・分子・イオン種) および温度の時間変化を測定した。(東大・宇宙研・阪大レーザー研との共同研究)

(3) 硫酸塩岩への衝突により発生する蒸気最終組成と生物大量絶滅事件への応用

6500 万年前にユカタン半島に隕石が衝突し生物大量絶滅が起こったとされているが具体的な機構はまだよくわかっていない。衝突地点には硫酸塩岩が多く含まれていることが分かっているため、硫酸塩岩に対して超高速度での衝突実験を行い、発生する蒸気の組成 (SO₂ や SO₃) を調べた。これにより衝突後、どのような過程により生物に影響が与えられたかが解明された。(千葉工大・阪大レーザー研との共同研究)

(4) クレーターサイズとスケーリング則 衝突の結果の一番基本的な物理量はクレーターサイズである。これまで秒速 10 km を越える衝突速度の場合に形成されるクレーターサイズは秒速 10 km 以下での実験の結果を基に作られたスケーリング則を用いて推定されていた。本研究ではこのスケーリング則の精度を確認し修正を行った。(神戸大・阪大レーザー研との共同研究)

(5) 放出破片のサイズ分布 衝突によって放出された破片を回収してサ

イズを測定した。秒速10 km以下での実験で得られている破片のサイズ分布と比較した結果、速度が大きな衝突の場合の方がより小さい破片が多く出ていることが分かった。これにより、たとえば、系外惑星の塵のサイズ分布が観測された場合に、その惑星系で起こっている衝突の状況(速度)が推定できる。(神戸大学・阪大レーザー研との共同研究)

(6) 衝撃波減衰率

一回の衝突でどれほどの蒸気、溶融物が形成されるのか、クレーターの深さがどれほどになるのかは衝撃波の減衰率に依存している。本研究で衝突後の標的を回収し断面を観測することでクレーターよりも内部の状態を調べた。クレーター底直下には溶融物、その下部には多くのクラックと細かい破片が存在し弾性を失っている領域、更にその外側にはクラックが入っているが弾性的な性質を残している領域が存在した。溶融する圧力、弾性限界の圧力は分かっているので、距離の関数として秒速10 km以上での衝突における圧力減衰を求めることができた。(阪大理・阪大レーザー研との共同研究)

(7) 衝突による有機物の反応

隕石には有機物が含まれているが、初期地球のような大気がまだ薄い時に衝突した隕石中の有機物がどうなるかを調べるために隕石試料に衝撃を与えて質量分析計により発生した気体の種類を調べ、更に試料を回収して残留した有機物を調べた。(阪大理・阪大レーザー研との共同研究)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① T. Kadono (他16名), Flyer acceleration by high-power laser and impact experiments at velocities higher than 10 km/s. In *the Proc 17th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter*, pp. 847-859, AIP Conference Proceedings 1426 (Eds., Mark L. Elert, William T. Buttler, John P. Borg, Jennifer L. Jordan, Tracy J. Vogler), doi: 10.1063/1.3686410 (2012). (査読有)
- ② K. Kurosawa, T. Kadono (他12名), Shock-Induced Silicate Vaporization: The Role of Electrons. *J. Geophys. Res.*, **117**, E04007, doi:10.1029/2011JE004031 (2012). (査読有)
- ③ S. Takasawa, A. M. Nakamura, T. Kadono (他16名), Silicate Dust Size Distribution from Hypervelocity Collisions: Implications for Dust Production in Debris Discs. *Astrophys. J.*

Let., 733, L39-L42, doi:10.1088/2041-8205/733/2/L39, (2011). (査読有)

- ④ S. Paleari (他7名7番目), Investigation of Carbon in Megabar Regime. *Nuclear Instr. Methods Phys. Res. Sec. A*, **653**, 116-120, doi:10.1016/j.nima.2011.01.008 (2011). (査読有)
 - ⑤ K. Kurosawa, S. Sugita, T. Kadono (他15名), In-situ Spectroscopic Observation of Silicate Vaporization due to > 10 km/s Impacts Using Laser Driven Projectiles. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L23203, doi: 10.1029/2010GL045330 (2010). (査読有)
 - ⑥ T. Kadono (他20名), Impact Experiments with a New Technique for Acceleration of Projectiles to Velocities Higher Than Earth's Escape Velocity 11.2 km/s. *J. Geophys. Res.*, **115**, E04003, doi: 10.1029/2009JE003385 (2010). (査読有)
 - ⑦ T. Kadono (他19名), Impact Experiments with Projectiles at Velocities Higher than 10 km/s. In *the Proc 16th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter*, pp. 875-877, AIP Conference Proceedings 1195 (2009). (査読有)
 - ⑧ 門野敏彦 (他21名), 2009. 高出力レーザーを使った弾丸飛翔体加速および衝突実験: 秒速10 kmを越える衝突. 遊星人(日本惑星科学会誌) 18巻1号, 4-9. (査読有)
 - ⑨ T. Kadono (他14名), Impact Vaporization of Rocks using a High-Power Laser. In *the Proc Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications* (IFSA2007), September 9-13, 2007, Kobe, J. Phys. Conf. Ser., **112** 042014 (2008). (査読有)
- [学会発表] (計9件)
- ① T. Kadono 他18名, X ray in hypervelocity impacts higher than 10 km/s, AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) 2012, (12 -17 August), Singapore, Singapore.
 - ② T. Kadono, Impact experiments in laboratories and planetary exploration, The 4th International Conference on Solar System Exploration and New Geosciences -Perspective for the Next Decade- (24 - 26 Feb. 2012), Tottori, Japan.
 - ③ T. Kadono 他18名, Laboratory experiments simulating meteorite impacts using high-power laser, The

7th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications 2011 (12 - 16 September, 2011), Bordeaux, France.

- ④ T. Kadono 他 18 名, Flyer acceleration by high-power laser and impact experiments with velocities higher than 10 km/s. 17th APS (American Physical Society) Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter 2011 (June 26 - July 1, 2011), Chicago, USA.
- ⑤ T. Kadono 他 9 名, Flyer acceleration using high-power laser and impact experiments at velocities 10-60 km/s, European Planetary Science Conference 2010, 23 Sep. 2010, Roma, Italy.
- ⑥ T. Kadono 他 12 名, Flyer Acceleration Using a High-Power Laser to Velocities Higher Than 10 km/s, Western Pacific Geophysical Meeting 2010 (招待講演) 22 June 2010, Taipei, Taiwan.
- ⑦ T. Kadono 他 20 名, 秒速 10 km を越える速度での衝突実験: 金属ターゲット上のクレーターと放出破片, 日本惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 18 日, 幕張メッセ国際会議場, (千葉).
- ⑧ 門野敏彦 他 17 名, 高出力レーザーによる弾丸飛翔体加速: 秒速 10 km 以上での衝突による LiF の蒸発, 日本惑星科学会 2008 年秋季講演会, 2008 年 11 月 1 日, 九州大学箱崎キャンパス, (福岡).
- ⑨ T. Kadono 他 14 名, Projectile acceleration to a velocity over the Earth's escape velocity and application in planetary science, HEDLA-08 (The 7th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics) April 11-15 2008, St. Louis, MO, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

門野敏彦 (KADONO TOSHIHIKO)
産業医科大学・医学部・教授
研究者番号: 60359198

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

重森啓介 (SHIGEMORI KEISUKE)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
研究者番号: 50335395

弘中陽一郎 (HIRONAKA YOICHIRO)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
研究者番号: 20293061

佐野孝好 (SANO TAKAYOSHI)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教
研究者番号: 80362606

藤岡慎介 (FUJIOKA SHINSUKE)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
研究者番号: 40372635

境家達弘 (SAKAIYA TATSUHIRO)
大阪大学・理学研究科・助教
研究者番号: 60452421

杉田精司 (SUGITA SEIJI)
東京大学・新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 80313203

黒澤耕介 (KUROSAWA KOHSUKE)
独立行政法人・宇宙科学研究所・研究員
研究者番号: 80616433

大野宗祐 (OHNO SOHSUKE)
千葉工業大学・惑星探査学研究センター・上席研究員
研究者番号: 80432631

松井孝典 (MATSUI TAKAFUMI)
千葉工業大学・惑星探査学研究センター・所長
研究者番号: 80114643

中村昭子 (NAKAMURA AKIKO)
神戸大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 40260012

荒川政彦 (ARAKAWA MASAHIKO)
神戸大学・理学研究科・教授
研究者番号: 10222738

近藤忠 (KONDO TADASHI)
大阪大学・理学研究科・教授
研究者番号: 20252223

藪田ひかる (YABUTA HIKARU)
大阪大学・理学研究科・助教
研究者番号: 30530844

山中高光 (KONDO TADASHI)
カーネギー地球物理学研究所・招聘上級研
究員
研究者番号：30011729